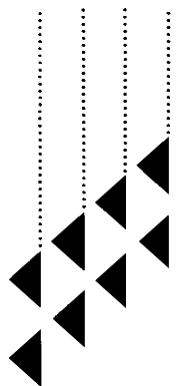




Principes d'utilisation des ultrasons : partie II – applications industrielles et commerciales

Code de sécurité 24



Canada

Principes d'utilisation des ultrasons : partie II – applications industrielles et commerciales

Code de sécurité 24

Direction de l'hygiène du milieu
Direction générale de la protection de la santé

Publication autorisée par le ministre de la
Santé nationale et du Bien-être social

Also available in English under the title
*Safety Code 24. Guidelines for the Safe Use of
Ultrasound: Part II – Industrial and Commercial
Applications*

DHM-RT-158

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1991

En vente au Canada par l'entremise des

Librairies associées
et autres libraires

ou par la poste auprès du

Groupe Communication Canada – Édition
Ottawa (Canada) K1A 0S9

N° de catalogue H46-2/90-158F
ISBN 0-660-93088-9

Avant-Propos

Les ultrasons ont de nombreuses applications dans l'industrie, le commerce, le secteur militaire et à la maison. Il existe suffisamment d'indices de la nocivité de l'exposition aux ultrasons pour justifier la prudence dans leur utilisation. L'objet du présent document est de servir de guide aux opérateurs et d'établir des pratiques sûres dans les applications commerciales et industrielles des ultrasons. Les pratiques de sécurité et les mesures de protection recommandées sont basées sur des données, figurant dans les pages qui suivent, concernant les effets sur la santé de l'exposition par contact aux ultrasons et de l'exposition aux ultrasons transmis dans l'air. Les normes d'exposition sont indiquées au tableau 5 de la section 4.2.1. Des renseignements supplémentaires sur la mesure de l'exposition aux ultrasons transmis dans l'air sont présentés à l'annexe 1.

Un document comme celui-ci ne peut traiter de toutes les applications possibles ou de toutes les situations d'exposition. Il ne peut non plus remplacer le bon sens dans des circonstances exceptionnelles, pour lesquelles il conviendra peut-être de modifier nos recommandations.

Ce document a été rédigé par Stephen Bly et Deirdre Morison, du Bureau de la radioprotection et des instruments médicaux. L'aide technique a été fournie par Robert Hussey et Judy Zohr.

Les personnes suivantes ont bien voulu revoir le texte. Nous avons tenu compte de leurs commentaires dans la rédaction du texte et nous désirons leur exprimer notre reconnaissance pour l'aide qu'elles nous ont ainsi apportée : E. Callary, D. Johnson et E.G. Létourneau, du Bureau de la radioprotection et des instruments médicaux; H.K. Lee, de la Sous-section de l'hygiène au travail, Direction générale des services médicaux, ministère de la Santé nationale et du Bien-être social; G.S.K. Wong, Section de l'acoustique et des normes mécaniques, Conseil national de recherches du Canada; D. Novitsky, Occupational Health Branch, Alberta; T.E. Dalglish, Department of Health and Fitness, Nouvelle-Écosse; K.L. Davies, ministère de la Santé et des Services communautaires, Nouveau-Brunswick; R.N. Ross, ministère de la Santé, Colombie-Britannique; M.E. Bitran, ministère du Travail, Ontario; J. Herbertz, Université de Duisburg (Allemagne de l'Ouest); F. Dunn, Université de l'Illinois à Urbana-Champaign; B. V. Seshagiri, Direction générale de la santé et de la sécurité au travail, Travail Canada; B. Pathak, Service des dangers physiques, Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail.

Les renseignements contenus dans le présent document n'y sont présentés qu'à titre indicatif. Pour tout problème d'interprétation du texte, veuillez entrer en communication avec la :

Section des rayonnements non ionisants
Bureau de la radioprotection et des instruments médicaux
Ministère de la Santé nationale et du Bien-être social
Ottawa (Ontario) Canada K1A 0L2

Table des matières

	Page
1. Introduction	7
2. Effets sur la santé des ultrasons utilisés dans l'industrie ou dans le commerce	10
2.1 Exposition par contact	10
2.2 Ultrasons transmis dans l'air	13
2.2.1 Réchauffement et cavitation	13
2.2.2 Effets sur l'ouïe – effets auditifs et physiologiques	14
2.2.3 Effets subjectifs	16
3. Exposition humaine aux ultrasons transmis dans l'air	20
4. Principes de sécurité	23
4.1 Ultrasons transmis par contact	23
4.2 Ultrasons transmis dans l'air	25
4.2.1 Limites d'exposition pour l'être humain	25
4.2.2 Mesures de protection contre l'exposition aux ultrasons transmis dans l'air	27
Annexe 1 – Mesure des ultrasons transmis dans l'air	29
Annexe 2 – Glossaire	34
Références	37
Liste des figures	
Figure 1. Résumé de données choisies sur les effets biologiques des faisceaux d'ultrasons sur les tissus des mammifères dans le bas de la gamme des MHz	11
Figure 2. Effets physiologiques des ultrasons transmis dans l'air	19
Figure 3. Panneau de mise en garde contre le rayonnement ultrasonore	24

	Page
Liste des tableaux	
Tableau 1. Applications industrielles des ultrasons de puissance élevée	8
Tableau 2. Niveaux de pression acoustique choisis, en dB, à la position de l'opérateur, pour une exposition à des sources ultrasonores industrielles, dans des bandes de tiers d'octave	21
Tableau 3. Niveaux de pression acoustique, en dB, pour divers appareils commerciaux	22
Tableau 4. Exemples de limites d'exposition professionnelle exprimées en niveaux de pression acoustique (dB)	26
Tableau 5. Lignes directrices canadiennes pour l'exposition aux ultrasons transmis dans l'air	27

1. Introduction

Les principes présentés ici, ainsi que les normes relatives aux limites d'exposition, visent à garantir la sécurité d'utilisation des ultrasons dans l'industrie et dans le commerce. Le domaine est vaste : les applications des ultrasons sont nombreuses et les techniques de production très diverses. Le tableau 1, extrait de Shoh (Sh 75) et Michael (Mi 74), dresse la liste des principales applications des ultrasons de puissance élevée, avec les fréquences ultrasonores et les gammes d'intensité correspondantes, ainsi qu'une brève description de l'application.

Les effets physiques et biophysiques des ultrasons de puissance élevée dépendent généralement des phénomènes complexes suivants provoqués par les vibrations dans le matériau :

1. cavitation et production de micro-courants dans les liquides;
2. instabilité superficielle aux interfaces liquide-liquide et liquide-gaz;
3. réchauffement et induction de fatigue dans les solides;
4. réchauffement des milieux liquides et assimilables à des liquides.

Dans les applications industrielles des ultrasons de puissance élevée, on expose l'objet ou la pièce à une énergie vibratoire suffisante pour opérer un changement physique permanent. Le principal danger pour l'utilisateur réside dans un contact accidentel avec l'onde ultrasonore. Cependant, nombre d'applications industrielles et commerciales des ultrasons produisent des niveaux de pression acoustique élevés dans l'air, dans la gamme des fréquences audibles et ultrasonores. Dans ce cas, il y a aussi un danger d'effet néfaste sur l'ouïe associé à l'exposition aux ultrasons transmis dans l'air.

Tableau 1.
Applications industrielles des ultrasons de puissance élevée
[Extrait de Shoh (Sh 75) et Michael (Mi 74)]

Application	Description	Fréquence (kHz)	Intensité (W/cm ²)
Nettoyage et dégraissage	Cavitation d'une solution pour nettoyer les pièces immergées	20 - 50	Environ 1-6 W/cm ² de surface exposée
Soudage et brasage	Déplacement d'une pellicule oxydée pour réaliser la soudure sans flux	-	1 - 50 W/cm ²
Soudage des plastiques	Soudage des plastiques mous ou rigides	Environ 20	Environ 100 W/cm ² à la soudure (700 W)
Soudage des métaux	Soudage de métaux semblables et non semblables	10 - 60	Environ 2000 W/cm ² à la buse
Usinage	Tournage, broyage des surfaces à l'aide de boues abrasives, perçage à l'aide d'une action vibratoire	En général 20	
Extraction	Extraction d'essences, jus et produits chimiques de fleurs, fruits et plantes	Environ 20	Environ 500 W/cm ² (100-500 watts)
Atomisation	Atomisation d'un combustible pour en améliorer le rendement de combustion et réduire la pollution; aussi, dispersion des métaux fondus	Entre 20 et 30	
Émulsification, dispersion et homogénéisation	Brassage et homogénéisation de liquides, boues et crèmes	-	-
Élimination de la mousse et dégazage	Séparation de la mousse et des gaz d'un liquide, réduction de la teneur en gaz et en mousse	-	-

Tableau 1 (suite)

Application	Description	Fréquence (kHz)	Intensité (W/cm ²)
Production de mousse dans les boissons	Déplacement de l'air par la mousse dans les bouteilles ou les contenants avant de les boucher	-	-
Électro-déposition	Augmentation de la vitesse de dépôt et production de revêtements plus denses et plus uniformes	-	-
Érosion	Test d'érosion par cavitation, ébavurage, arrachage	-	-
Séchage	Séchage des poudres, produits alimentaires et produits pharmaceutiques sensibles à la chaleur	-	-

Un certain nombre d'applications commerciales directes des ultrasons transmis dans l'air, comme les dispositifs d'alarme anti-vol, les systèmes d'ouverture automatique des portes, les convertisseurs pour câbloréception et les dispositifs de mise au point automatique en photographie, produisent également, dans certains cas, des niveaux de pression acoustique relativement élevés, dans la gamme des fréquences ultrasonores. Là encore, il y a des risques d'effets néfastes sur l'ouïe.

Pour tenir compte des différences entre les deux types de danger, nous énoncerons séparément les principes de sécurité et les lignes directrices s'appliquant à l'exposition par contact et à l'exposition aux ultrasons transmis dans l'air.

2. Effets sur la santé des ultrasons utilisés dans l'industrie ou dans le commerce

2.1 Exposition par contact

Il y a exposition par contact lorsqu'il n'y a pas de couche d'air entre le transducteur et le tissu. Cette exposition peut avoir lieu par contact direct et intime entre le transducteur et le tissu ou par couplage liquide ou solide. Dans certains cas, lors d'une exposition par contact, le transfert d'énergie du transducteur au tissu peut atteindre presque 100 p. 100. Par contre, la présence d'une couche d'air peut réduire le transfert d'énergie ultrasonore par des facteurs de l'ordre de plusieurs puissances de dix. Par exemple, si une personne plonge un doigt dans le bain d'un humidificateur à ultrasons, l'énergie transférée à l'os lors de cette exposition directe est de l'ordre de 65 p. 100 de l'énergie rayonnée; par contre, si la personne tient son doigt juste au-dessus de l'eau, l'énergie ultrasonore transférée au doigt est un million de fois plus faible.

Des données choisies sur les effets biologiques de l'exposition par contact aux ultrasons sur les tissus des mammifères sont résumées sur le graphique de la figure 1 (NCRP 83). Les courbes représentent les intensités au-dessous desquelles aucun effet biologique important confirmé indépendamment n'a été observé.

Des appareils tels que les humidificateurs à ultrasons, fonctionnant à des fréquences de quelques MHz seulement, peuvent provoquer des lésions tissulaires *si et seulement si* il y a exposition par contact. Certains incidents ont été signalés et l'on sait que, lorsque l'humidificateur à ultrasons fonctionne à pleine puissance, l'exposition par contact d'un doigt au faisceau ultrasonore provoquera une douleur aiguë en quelques secondes seulement, due probablement à un réchauffement excessif de l'os.

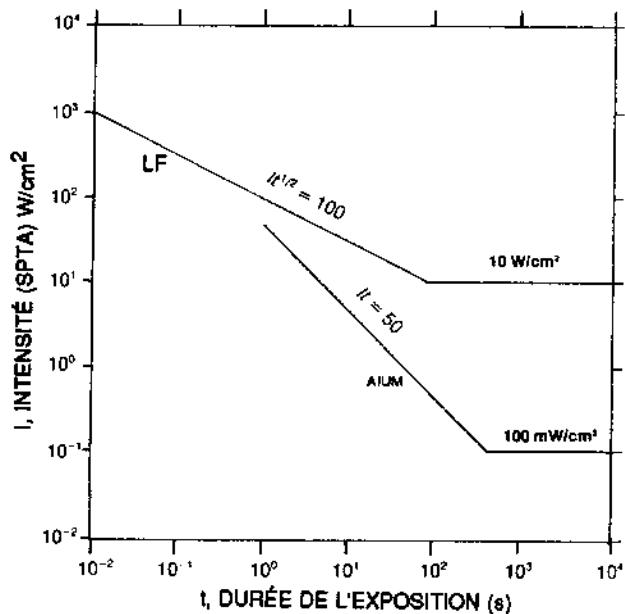


Figure 1.

Graphique représentant les intensités au-dessous desquelles aucun effet biologique important confirmé indépendamment n'a été observé dans les tissus des mammifères. La courbe supérieure (LF) s'applique aux lésions focales; les valeurs des intensités sont des valeurs in situ. La courbe inférieure (AIUM) est une représentation graphique de la déclaration relative aux effets biologiques des ultrasons sur les mammifères exposés *in vivo* du Bioeffects Committee de l'American Institute for Ultrasound in Medicine (AIUM). Les fréquences ultrasonores se situent dans la gamme de 1 à 10 MHz et les intensités de crête dans l'espace moyennes dans le temps, $I_{(SPTA)}$, sont mesurées dans l'eau (NCRP 83).

Les ultrasons de puissance élevée présentent aussi un danger à des fréquences inférieures au MHz. Par exemple, on utilise des ondes ultrasonores de grande puissance dans les appareils de nettoyage et les désintégrateurs de cellules ultrasonores en raison de leurs effets violents et destructeurs. Il est fort probable que le bain (eau ou solvant) de ces appareils soit le siège d'une cavitation relativement intense (AC 83; OMS 88). Néanmoins, les cas signalés de lésions

tissulaires sont rares. Un rapport fait état de douleurs aux mains chez des volontaires qui s'étaient exposés aux faisceaux ultrasonores émis par des appareils de nettoyage fonctionnant à des fréquences comprises entre 20 et 40 kHz. Toutefois, aucun effet immédiat n'a été observé lors d'une exposition à un faisceau ultrasonore de 80 kHz (Fi 68) émis par un appareil de nettoyage.

Dans deux études sur les dangers des ultrasons utilisés dans l'industrie (Ac 77, Ac 83), Acton a été incapable de confirmer qu'une exposition continue à un faisceau ultrasonore par couplage liquide pouvait entraîner une nécrose ou une dégénérescence de l'os. Par ailleurs, selon une étude récente menée par Carnes et Dunn (Ca 86), des lésions testiculaires ont été observées chez seulement 4 souris parmi les 150 exposées à un faisceau ultrasonore émis par un homogénéisateur de tissus de 25 kHz fonctionnant à une intensité de 15 W/cm².

La documentation qui existe sur des appareils tels que les appareils de nettoyage à ultrasons et les homogénéisateurs de tissus porte à confusion : ces appareils ne semblent pas aussi dangereux qu'on pourrait s'y attendre, compte tenu des effets visés. Cependant, bien que l'on signale très peu d'effets biologiques, l'exposition aux ultrasons transmis dans un liquide, émis par ces appareils, peut effectivement provoquer des lésions et il convient de prendre des mesures de protection.

La documentation sur les dangers d'appareils tels que les machines à souder est encore plus rare. Néanmoins, un rapport récent (Fe 84) fait état d'une brûlure consécutive à une exposition par contact à un faisceau ultrasonore émis par une machine utilisée pour le soudage des matières plastiques, fonctionnant à une fréquence de 20 kHz. L'exposition n'a duré qu'une fraction de seconde, mais elle a été suffisante pour causer une grave brûlure localisée au doigt de l'opérateur.

Les appareils ultrasonores industriels sont conçus de façon que les personnes qui travaillent avec ces appareils ne soient pas exposées, directement ou par couplage liquide ou solide, aux transducteurs émettant des faisceaux ultrasonores de puissance élevée (ou de grand intensité). Cependant, un contact direct, à la suite d'un accident ou d'une négligence, est toujours possible. Il est donc important de prendre toutes les précautions nécessaires pour éviter une exposition accidentelle.

2.2 Ultrasons transmis dans l'air

On a commencé à se préoccuper des effets possibles de l'exposition au rayonnement ultrasonore ou aux fréquences audibles supérieures⁽¹⁾ transmis dans l'air à la fin des années 40, à la suite de la publication de certains rapports signalant des malaises dus aux ultrasons chez les personnes travaillant à proximité des avions à réaction (Da 48). On a alors entrepris des études sur les effets biologiques des ultrasons transmis dans l'air (effets sur l'ouïe et effets ne touchant pas l'ouïe).

2.2.1 Réchauffement et cavitation

Les mécanismes les plus plausibles des effets des ultrasons transmis dans l'air sur l'être humain, autres que les effets sur l'ouïe, sont le réchauffement et la cavitation. D'après les exemples de seuils de cavitation donnés par Neppiras (Ne 80), les ultrasons transmis dans l'air ne devraient pas donner lieu au phénomène de cavitation lorsque le niveau de pression acoustique est inférieur à environ 190 dB. Cette valeur est bien supérieure aux niveaux de pression acoustique auxquels il se produit un réchauffement.

Un certain nombre d'études sur les effets des ultrasons transmis dans l'air ont été entreprises sur des mammifères et des insectes. Les effets observés ont été attribués au réchauffement. À 160 dB⁽²⁾ et 20 kHz, Allen et coll. (Al 48) ont signalé la mort d'insectes et de souris à la suite d'expositions dont les durées variaient de 10 secondes à 3 minutes. Dans ces expériences, il a été établi que le réchauffement dû à l'absorption de l'énergie sonore était suffisant pour provoquer la mort. Parrack et ses collègues ont démontré que, aux fréquences ultrasonores, la majeure partie de l'absorption d'énergie observée dans les études avec les rats était due au poil des rats (Gi 49, Gi 52, Pa 66). Le rapport entre l'énergie absorbée et l'énergie incidente pour le corps humain était dix fois plus faible que pour un rat tondu. Danner et coll. (Da 54) ont trouvé que le seuil de réchauffement se situait à un NPA de 144 dB pour une souris avec son poil et de 155 dB pour une souris tondue, à des fréquences de 18-20 kHz. D'après ces résultats, le NPA devrait être d'au moins 155 dB pour qu'il y ait une

1. Voir la signification de ce terme dans le glossaire (Annexe 2).

2. Dans l'air, la conversion entre le niveau de pression acoustique, NPA, en dB, et l'intensité, I , en W/cm^2 , est donnée par $I = 10^{(\text{NPA}-160)/10}$. Un NPA de 160 dB correspond donc à une intensité de 1 W/cm^2 .

élévation de température rapide et nocive chez les êtres humains et, d'après les calculs de Parrack (Pa 66), le niveau de pression acoustique létal pour les êtres humains serait de 180 dB.

On peut trouver d'autres renseignements sur le réchauffement dû aux ultrasons chez les êtres humains dans le rapport publié par Allen et coll. (Al 48). Ce rapport fait état d'expositions à un niveau de pression acoustique de 165 dB. A ce niveau, le réchauffement local dans les fentes entre les doigts a causé des brûlures presque instantanément. On a observé un réchauffement douloureux après plusieurs secondes d'exposition de surfaces plus étendues telles que la paume de la main. Par ailleurs, Acton (Ac 74) fait état de travaux non publiés réalisés par Parrack, selon lesquels on a observé un léger réchauffement des plis de la peau à des niveaux de pression acoustique situés entre 140 et 150 dB. Parmi les autres effets ne touchant pas l'ouïe à ces niveaux élevés, on note des sensations extrêmement désagréables dans les conduits nasaux.

Nous pouvons donc conclure que, à des niveaux de pression acoustique supérieurs à environ 155 dB, l'exposition à des ultrasons transmis dans l'air provoquera des effets nocifs aigus chez l'être humain, dus principalement à l'absorption de l'énergie sonore et au réchauffement subséquent. Il est probable que des expositions prolongées chroniques à des niveaux compris entre 145 et 155 dB soient également nocives car elles pourraient élever la température du corps à des niveaux correspondant à une fièvre légère pendant les périodes d'exposition. Cependant, comme il est indiqué dans la section 3, ces niveaux de pression acoustique élevés n'ont jamais été observés à proximité des appareils commerciaux ou industriels.

2.2.2 Effets sur l'ouïe – effets auditifs et physiologiques

Les principaux effets des ultrasons transmis dans l'air que l'on peut observer en pratique sont associés à la réception des ondes ultrasonores par l'oreille. Les effets se classent en deux grandes catégories : les effets dits «subjectifs» sur le système nerveux central et les lésions de l'oreille. Les normes d'exposition sont principalement basées sur ces effets car ils se produisent à des niveaux de pression acoustique inférieurs aux niveaux qui entraînent un réchauffement.

Deux rapports font état d'une perte d'audition temporaire à des fréquences inférieures à 8 kHz, à la suite d'une exposition à des ultrasons transmis dans l'air avec un niveau de pression acoustique élevé. Parrack (Pa 66) a observé que, pour des expositions de cinq minutes à des fréquences choisies entre 17 et 37 kHz, à des niveaux

de pression acoustique situés entre 148 et 154 dB, la sensibilité auditive était réduite aux fréquences sous-harmoniques. Des pertes légères d'audition se produisaient à l'occasion à la troisième sous-harmonique. Les personnes atteintes retrouvaient rapidement toute leur sensibilité. Dobroserdov (Do 67) a mesuré les réductions de sensibilité auditive à des fréquences de 4, 10, 14 et 15 kHz après une exposition d'une heure à des ultrasons de 20,6 kHz, à un niveau de pression acoustique de 120 dB. Il n'a observé aucun effet important lors d'expositions à des niveaux de pression acoustique de 100 dB.

On ne possède pas de preuves que des niveaux de pression acoustique inférieurs à 120 dB, à des fréquences ultrasonores, peuvent entraîner des pertes d'audition. Dans une étude portant sur 18 hommes travaillant avec des appareils de nettoyage et autres instruments à ultrasons, Knight (Kn 68) n'a découvert aucune preuve de perte d'audition attribuable à une exposition aux ultrasons. Dans une étude de 31 oreilles chez 16 sujets exposés à des niveaux de pression acoustique atteignant 110 dB dans les bandes de tiers d'octave centrées sur 20 et 25 kHz, Acton et Carson (Ac 67) n'ont observé aucun déplacement temporaire de seuil (TTS). Grigor'eva (Gr 66) a exposé cinq volontaires à un son pur de 20 kHz à 110-115 dB pendant une heure et n'a constaté aucune modification de la sensibilité auditive (ni du pouls ou de la température de la peau). Cependant, Grigor'eva a apparemment observé un déplacement temporaire de seuil lors d'expositions à des sons purs de 16 kHz pour des niveaux de pression acoustique supérieurs à 90 dB.

Récemment, Grzesik et Pluta (Gr 83) ont étudié l'ouïe de 55 opérateurs d'appareils à nettoyer et à souder ultrasonores. Ils n'ont observé aucune différence dans les seuils d'audition entre les personnes exposées et les témoins à des fréquences comprises entre 0,5 et 8 kHz. Toutefois, ils font état de différences d'audition significatives entre les sujets exposés et les témoins dans la plage de 10-20 kHz. Ils ont noté des élévations de seuil et un nombre décroissant de sujets répondant à des stimuli dans la plage supérieure des fréquences audibles. Dans une étude de suivi sur 26 de ces travailleurs, Grzesik et Pluta (Gr 86) ont conclu que l'exposition professionnelle de ces travailleurs aux champs acoustiques créés par les appareils à nettoyer et à souder ultrasonores entraînait une perte d'audition d'environ 1 dB/an dans la plage de fréquences de 13-17 kHz. Les spectres acoustiques de ces appareils (Gr 80, Gr 83) montrent que les niveaux de pression acoustique se situent entre 80 et 102 dB à des fréquences comprises entre 10 et 18 kHz (fréquences audibles supérieures) alors qu'ils se situent entre 100 et 116 dB à des fréquences supérieures à 20 kHz. En l'absence d'une corrélation directe entre les

spectres acoustiques et les effets mesurés sur l'audition, il est impossible de définir avec certitude les fréquences responsables des pertes d'audition aux fréquences élevées. Toutefois, il est plus probable que ce soit les fréquences audibles supérieures, et non le rayonnement ultrasonore, qui aient entraîné les pertes d'audition mesurées dans ces études puisque les niveaux de pression acoustique élevés étaient plus fréquents dans la plage des fréquences audibles supérieures que dans la plage des fréquences ultrasonores (Gr 80, Gr 83). Par ailleurs, comme il est mentionné ci-dessus, on a apparemment observé des déplacements temporaires de seuil chez des sujets exposés à des sons purs dans la gamme des fréquences audibles supérieures, entre 10 et 16 kHz, avec des niveaux de pression acoustique supérieurs à 90 dB. En outre, il n'y a pas d'autres preuves bien établies d'effets sur l'audition à des niveaux de pression acoustique ultrasonores inférieurs à 120 dB.

D'autres effets physiologiques des ultrasons transmis dans l'air risquent de se produire seulement à des niveaux de pression acoustique supérieurs ou égaux aux niveaux provoquant un déplacement temporaire de seuil. Knight (Kn 68) et Grigor'eva (Gr 66) n'ont trouvé aucune preuve d'effets physiologiques à des fréquences ultrasonores. Dobroserdov (Do 677) a observé une perte importante d'équilibre et une réduction du temps de réponse motrice lors d'exposition à des niveaux de pression acoustique de 120 dB à 20 kHz, mais les effets étaient négligeables à 100 dB, à la même fréquence.

2.2.3 Effets «subjectifs»

On a signalé un certain nombre d'effets «subjectifs» des ultrasons transmis dans l'air, dont de la fatigue, des maux de tête, des nausées, des acouphènes et une perturbation de la coordination neuro-musculaire [Sk 65, Ac 67, Ac 68, Cr 77, FDA 81 (b)]. Skillern (Sk 65) a mesuré les spectres de bande de tiers d'octave de 10 à 31,5 kHz pour un certain nombre d'appareils à ultrasons et il a observé que les effets subjectifs étaient associés aux appareils qui produisaient des niveaux de pression acoustique supérieurs à 80 dB dans la gamme de fréquences considérée.

Acton et Carson (Ac 67) ont étudié les effets des ultrasons sur 18 jeunes femmes travaillant près d'une batterie de nettoyeurs «ultrasonores». Les sujets, exposés aux ultrasons et à l'énergie acoustique audible, se plaignirent de fatigue, de maux de tête, de nausée et d'acouphènes. Ces constatations furent confirmées par des expériences de laboratoire subséquentes dans lesquelles des sujets humains furent exposés à un rayonnement acoustique haute fréquence, dont une partie était audible. Les mêmes sujets exposés à des énergies

hautes fréquences de même niveau, mais sans composante audible, n'eurent rien à signaler. Acton et Carson conclurent que les sujets devaient être exposés à des fréquences audibles pour que l'on observe des effets subjectifs. À l'appui de cette conclusion, ils notèrent que les femmes se plaignaient plus de ces effets que les hommes. Puisque les hommes exposés lors de leurs expériences étaient plus âgés et avaient tous été exposés au bruit (ils avaient perdu une certaine sensibilité auditive aux hautes fréquences), il était raisonnable de supposer que le rayonnement était en grande partie inaudible pour nombre d'entre eux.

Une analyse détaillée des données d'Acton et Carson a montré qu'il n'y avait pas d'effets subjectifs si les niveaux de pression acoustique dans les bandes de tiers d'octave étaient inférieurs à 75 dB pour des fréquences centrales inférieures ou égales à 16 kHz et à 110 dB pour des fréquences centrales supérieures ou égales à 20 kHz (Ac 68). Acton fit remarquer que ce critère relatif à l'apparition d'effets subjectifs concordait avec les données de Skillern (Sk 65) et il proposa de le choisir comme norme d'exposition. Acton modifia la norme en 1975 (Ac 75). Dans la norme révisée, la limite de 75 dB a été étendue pour inclure la bande de tiers d'octave centrée sur 20 kHz. Cette modification a été apportée après la publication d'autres rapports sur les effets subjectifs. Acton observa que des effets subjectifs pouvaient encore se produire en dessous de 110 dB dans la bande de tiers d'octave centrée sur 20 kHz (Ac 75). Il expliqua cette observation par le fait que les limites de fréquence nominale de la bande de tiers d'octave centrée sur 20 kHz sont égales à 17,6 kHz et 22,5 kHz. La limite inférieure de cette bande de fréquences se situait dans la partie supérieure de la gamme des fréquences audibles d'une grande partie de la population et, par conséquent, des effets subjectifs pouvaient encore se produire à des niveaux relativement bas.

Dans leur ensemble, les résultats des études sur les effets subjectifs montrent que ces effets constituent une réaction du système nerveux central aux fréquences audibles supérieures ou aux ultrasons lorsque ces derniers deviennent audibles. La forme du critère obtenu empiriquement par Acton semble indiquer que les ultrasons peuvent devenir audibles si les niveaux de pression acoustique sont suffisamment élevés et que le seuil d'audition s'élève rapidement lorsqu'on passe des fréquences audibles supérieures aux fréquences ultrasonores. Ce résultat est, qualitativement, en accord avec les niveaux de pression acoustique en champ libre correspondant au seuil d'audition moyen mesurés par Herbertz et Grunter (He 81, He 84) pour les fréquences audibles et ultrasonores situées entre 10 et 31,5 kHz. Des moyennes de leurs valeurs ont été calculées dans deux études

distinctes menées sur un total de 30 sujets possédant une audition normale, âgés de 20 à 41 ans. Le seuil moyen d'audition augmentait rapidement et de façon monotone avec la fréquence à raison de 12 dB par kHz environ entre 14 et 20 kHz, avec un seuil d'audition moyen d'approximativement 100 dB à 20 kHz (He 84) et 125 dB à 25 kHz. Au-dessus de 20 kHz, les ultrasons peuvent sembler audibles en raison de la production de sous-harmoniques dans l'oreille (Gi 50). Ce phénomène a été observé à des niveaux supérieurs à 110 dB chez le chinchilla et le cobaye (Da 66). L'hypothèse que les ultrasons semblent audibles en raison de la production de sous-harmoniques dans l'oreille est aussi en accord avec l'étude de Parrack susmentionnée, dans laquelle une perte d'audition à court terme avait été observée à des sous-harmoniques des fréquences du rayonnement après une exposition à des ultrasons transmis dans l'air avec des niveaux de pression acoustique élevés (Pa 66).

En résumé, l'exposition à un rayonnement ultrasonore suffisamment intense semble provoquer un syndrome se manifestant par des nausées, des maux de tête, des acouphènes, des douleurs, une sensation de vertige et de la fatigue. La nature et l'ampleur des symptômes semblent varier selon le spectre réel du rayonnement ultrasonore et la sensibilité particulière de la personne exposée, plus particulièrement son acuité auditive aux hautes fréquences.

Acton a publié un résumé concis des effets physiologiques des ultrasons dans des conditions d'exposition précises. Ce résumé est présenté sous forme modifiée à la figure 2 (Ac 74).

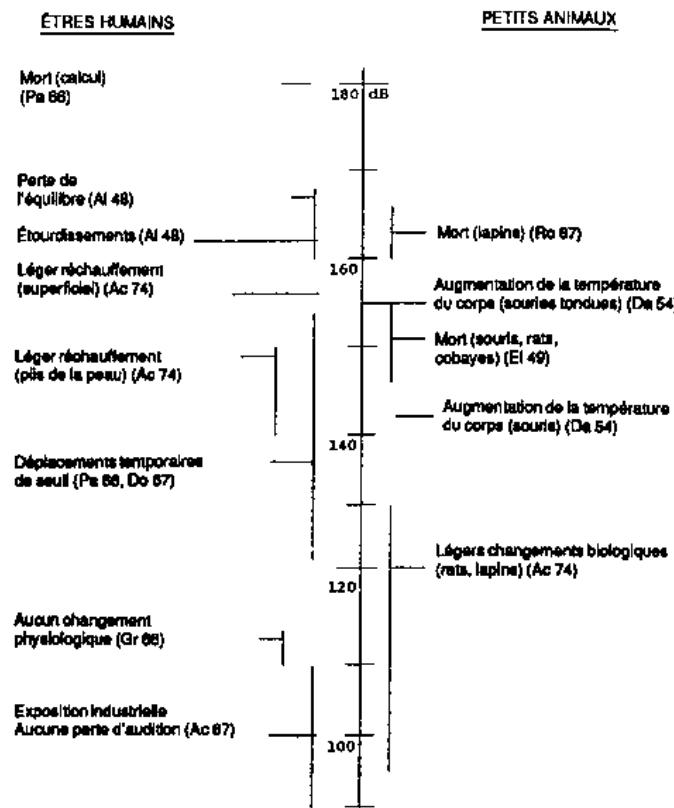


Figure 2.
Effets physiologiques des ultrasons transmis dans l'air
(Adaptation du résumé publié par Acton (Ac 74)).

3. Exposition humaine aux ultrasons transmis dans l'air

Un certain nombre d'études ont été menées et plusieurs rapports ont été publiés sur l'exposition des travailleurs aux ultrasons transmis dans l'air (Sk 65, Pa 66, Mi 74, Ac 67, Do 67, Gr 80, Sw 82, An 86). Les valeurs des niveaux de pression acoustique obtenues varient considérablement suivant l'appareil, l'emplacement où la mesure a été effectuée par rapport à l'appareil et la présence ou l'absence de protection. Des exemples choisis de niveaux de pression acoustique, mesurés à la position de l'opérateur, sont donnés dans le tableau 2.

Grzesik et Pluta (Gr 80, Gr 83) ont mesuré les niveaux de pression acoustique dans des bandes de tiers d'octave à la position de l'opérateur, produits par des appareils de nettoyage ultrasonores fonctionnant à des fréquences de 25 et 28 kHz ainsi qu'à des fréquences sous-harmoniques de 12,5 et 14 kHz. Les niveaux de pression acoustique aux fréquences fondamentales se situaient entre 100 et 116 dB et les sous-harmoniques avaient des NPA de 80-102 dB. Avec les machines à souder ultrasonores, la fréquence moyenne était de 21 kHz et le NPA maximal était de 106 dB dans la bande de tiers d'octave centrée sur 20 kHz. Les résultats obtenus au cours des 25 dernières années sont, dans leur grande majorité, en accord avec l'assertion de Grigor'eva selon laquelle les niveaux de pression acoustique produits par des machines ultrasoniques dans la gamme des fréquences ultrasonores dépassent rarement 120 dB (Gr 66).

Depuis 1976, un certain nombre de mesures des NPA du rayonnement ultrasonore transmis dans l'air produits par des appareils commerciaux a été réalisé par le Bureau de la radioprotection et des instruments médicaux (BRPIM) au Canada et par le Center for Devices and Radiological Health (CDRH) de la Food and Drug Administration (FDA) aux États-Unis. Le tableau 3 contient plusieurs exemples des NPA maximaux observés pour des positions typiques de l'opérateur. Étant donné que ces appareils émettent des sons purs, les valeurs correspondant aux bandes latérales ne sont pas indiquées. Les appareils commerciaux émettent habituellement des sons purs uniques (bien que des balayages de fréquences soient parfois utilisés) et les niveaux de pression acoustique ont tendance à être inférieurs à ceux observés dans les cas d'exposition à des appareils industriels.

Tableau 2
Niveaux de pression acoustique choisis, en dB, à la position de l'opérateur pour une exposition à des sources ultrasonores industrielles, dans des bandes de tiers d'octave

Référence	Appareil Ultrasonore	Fréquence au centre de la bande de tiers d'octave (kHz)					
		10	12,5	16	20	25	31,5
(Sk 65)	Perceuse (sans protection)	91	85	90	81	108	84
(Sk 65)	Machine à souder	76	95	115	93	73	69
(Sk 65)	Appareil à nettoyer	<61	<61	<61	83	67	<61
(Sk 65)	Appareil à nettoyer	77	78	79	96	77	77
(Pa 66)	Moteur à réaction (Post-combustion)	114	113	11	108	106	103
(Cr 77)	Appareil à nettoyer	86	77	86	105	97	80
(Ac 67)	Perceuse	75	67	75	97	75	78
(Ac 67)	Appareil à nettoyer (petit)	53	61	91	83	75	102
(Ac 67)	Appareil à nettoyer (grand)	83	86	91	96	91	102
(An 86)	Machine à souder	S.O.	S.O.	S.O.	127	S.O.	S.O.
(An 86)	Machine à souder	S.O.	S.O.	S.O.	106	S.O.	S.O.
(Sw 82)	Appareil à nettoyer	78	66	76	97	74	70
(Sw 82)	Machine à souder (sans protection)	106	114	119	96	80	56

Tableau 3
Niveaux de pression acoustique, en dB, pour divers appareils commerciaux

Référence	Appareil Ultrasonore	Fréquence au centre de la bande de tiers d'octave (kHz)					
		10	12,5	16	20	25	31,5
BRPIM	Terminaux à écran de visualisation	-	-	66	-	-	-
CDRH(a)	Terminaux à écran de visualisation	-	-	61	-	-	68
BRPIM	Capteur ultrasonore de présence humaine	-	-	-	-	94	-
CDRH(b)	Appareil d'alarme ultrasonore	-	-	-	93	-	-
CDRH(b)	Appareil ultrasonore pour repousser les chiens	-	-	108	-	-	-

- (a) Extrait de [FDA 81(a)]. Les résultats pour deux terminaux à écran de visualisation fonctionnant à des fréquences très différentes sont indiqués.
- (b) Extrait de [FDA 81(b)]. La position où l'exposition est mesurée pour l'appareil ultrasonore à repousser les chiens n'est pas la position normale, dans le cas présent (à cinq pieds devant l'appareil). Dans la plupart des cas, c'est le chien, et non un être humain, qui se trouve dans cette position.

En résumé, l'exposition à des appareils ultrasonores industriels dépasse rarement 120 dB. L'exposition à des appareils commerciaux conçus pour émettre des ultrasons dépasse rarement 110 dB. Les appareils commerciaux qui émettent accidentellement des ultrasons, tels que les terminaux à écran de visualisation, produisent des niveaux de pression acoustique à l'oreille de l'opérateur inférieurs à 70 dB et très rarement supérieurs à 65 dB.

Les appareils ultrasonores industriels produisent également des sons audibles. Il convient de ne pas ignorer ces expositions à des fréquences audibles lorsqu'on évalue les dangers des appareils ultrasonores industriels. Il est amplement prouvé dans les études mentionnées dans la section 2 que, à des niveaux de pression acoustique équivalents, les fréquences audibles émises par les appareils à ultrasons sont beaucoup plus dangereuses que les fréquences ultrasonores.

4. Principes de sécurité

4.1 Ultrasons transmis par contact

L'exposition par contact à des ultrasons de puissance élevée doit être évitée à tout prix.

Nous recommandons les mesures suivantes pour garantir la sécurité d'utilisation des ultrasons de puissance élevée, généralement employés dans le but de provoquer un changement physique permanent dans un système :

1. Occupation limitée –

Seuls les opérateurs habilités à utiliser du matériel à ultrasons de puissance élevée ou des personnes bien encadrées peuvent se trouver à l'intérieur de l'enceinte réservée au matériel pendant son fonctionnement.

2. Responsabilité du personnel –

Le personnel utilisant des appareils à ultrasons de puissance élevée et les inspecteurs de sécurité industrielle doivent connaître les effets néfastes possibles des ultrasons ainsi que les mesures de protection nécessaires.

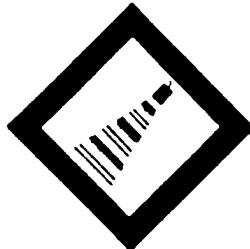
3. Panneaux de mise en garde –

Le panneau de mise en garde contre le rayonnement ultrasonore que nous recommandons est montré à la figure 3. Ces panneaux doivent être posés à l'entrée de toute zone qui contient du matériel à ultrasons de puissance élevée ou sur chaque appareil à ultrasons de puissance élevée. Ils doivent être accompagnés d'une note appropriée indiquant les précautions à prendre pendant le fonctionnement de l'appareil.

4. Cuves de nettoyage à ultrasons –

Toutes les cuves de nettoyage à ultrasons doivent porter une étiquette indiquant qu'il faut veiller à ce que les mains ou aucune autre partie du corps ne soient immergées dans la cuve pendant son fonctionnement.

ULTRASONS



DANGER

Figure 3.
Panneau de mise en garde contre le rayonnement ultrasonore.

Pour les grandes cuves de nettoyage, qu'il est difficile d'arrêter pour retirer ou introduire les objets, on peut suspendre ces derniers à des crochets ou dans des paniers. S'il est impossible de prendre ces mesures de protection et s'il faut absolument immerger les mains ou les bras, on doit, en dernier recours, utiliser des gants doublés de fourrure ou de bourrure de laine. Ces gants offrent une protection adéquate puisque la couche d'air emprisonnée provoque un désaccord d'impédance acoustique suffisant pour réduire l'énergie ultrasonore transmise au corps. Cependant, les gants doivent être suffisamment longs et en bon état (Ac 77), car toute défectuosité dans cette couche d'air supprimerait la protection.

5. Autres appareils à ultrasons de puissance élevée –
Toute appareil à ultrasons de puissance élevée pouvant d'exposer par contact une personne aux ultrasons émis doit porter une étiquette précisant que l'appareil ou une certaine partie de l'appareil ne doit pas être touché pendant son fonctionnement. Là où c'est nécessaire, les sources solides d'ultrasons peuvent être manipulées avec des outils appropriés.
Les niveaux utilisés dans les appareils à ultrasons de faible puissance sont tels que les risques de subir des lésions par contact sont minimes. Cependant, puisque les données dont nous disposons sur les effets biologiques ne sont pas concluantes, il convient d'éviter le plus possible les expositions par contact.

4.2 Ultrasons transmis dans l'air

4.2.1 Limites d'exposition pour l'être humain

Les études sur les effets biologiques des ultrasons décrites à la section 2 ont donné lieu à des interprétations et des analyses légèrement différentes. Cependant, plusieurs pays sont arrivés à des recommandations similaires en ce qui concerne l'exposition de l'être humain aux fréquences audibles supérieures et ultrasonores. Ces recommandations sont résumées au tableau 4 (Ma 85).

Deux autres normes, relativement différentes, ont aussi été proposées. L'U.S. Air Force (USAF 76) a fixé une limite de 85 dB pour chaque bande de tiers d'octave de 12,5 à 40 kHz. Si l'on fait des comparaisons avec certains spectres de Skillern et Acton pour lesquelles on observe des effets subjectifs, ces limites peuvent sembler trop élevées dans les bandes centrées sur 16 et 20 kHz pour protéger adéquatement contre les effets subjectifs et trop strictes dans les bandes centrées sur 25 et 40 kHz. L'autre norme a été proposée par auf der Maur dans son article (Ma 85). Cette norme, basée sur le filtre pondéré AU proposé par Herbertz (He 84), a apparemment été prise en considération par plusieurs organismes. Cependant, les niveaux élevés autorisés, par exemple 105 dB dans la bande centrée sur 16 kHz, 120 dB dans la bande centrée sur 20 kHz et 140 dB dans la bande centrée sur 31,5 kHz, semblent excessivement élevés lorsqu'on tient compte des données sur les effets subjectifs. Par ailleurs, les niveaux permis par cette norme dans les bandes centrées sur 16 et 20 kHz sont supérieurs ou égaux aux niveaux pour lesquels Grigor'eva et Dobroserdov ont observé des déplacements temporaires de seuil chez leurs sujets exposés (Gr 66, Do 67). La valeur de 140 dB se situe à la limite inférieure de la plage dans laquelle un léger réchauffement des plis de la peau a été signalé (Ac 74).

À l'heure actuelle, la norme par tiers d'octave modifiée d'Acton semble être la plus appropriée pour définir des limites d'exposition. Elle est basée sur la comparaison la plus exhaustive des spectres par bande de tiers d'octave qui ait été publiée ainsi que sur la présence d'effets subjectifs.

Les recommandations canadiennes en matière de limites d'exposition sont indiquées au tableau 5. Ces limites sont données dans des bandes de tiers d'octave dont la fréquence médiane varie de 16 kHz à 50 kHz. Les limites d'exposition sont indépendantes de la durée car les effets subjectifs peuvent apparaître presque immédiatement (AIRP 84). En dessous de la bande de tiers d'octave centrée sur 16 kHz, le son doit être clairement classé comme audible et il doit

être évalué à l'aide des critères établis dans les lois et règlements fédéraux et provinciaux ou règlements municipaux existants sur le bruit. La grande différence entre la bande de tiers d'octave centrée sur 20 kHz et la bande de tiers d'octave centrée sur 25 kHz est basée sur l'analyse empirique de données d'exposition industrielle réalisée par Acton. Cette différence est en accord, qualitativement, avec l'élévation abrupte du seuil d'audition moyen mesurée par Herbetz et Grunter (He 81, He 84), qui passe d'environ 75 dB à 17,5 kHz à 115 dB à 22,5 kHz.

Tableau 4
Exemples de limites d'exposition professionnelle exprimées en niveaux de pression acoustique (dB). Les niveaux de pression acoustique sont mesurés dans des bandes de tiers d'octave

Fréquence kHz	Proposée par *					
	1	2	3	4	5	6
8	90	75	-	-	-	-
10	90	75	-	-	80	-
12,5	90	75	75	-	80	-
16	90	75	85	-	80	-
20	110	75	110	105	105	75
25	110	110	110	110	110	110
31,5	110	110	110	115	115	110
40	110	110	110	115	115	110
50	110	-	110	115	115	110

*Légende:

1. Japon (1971)
2. Acton (1975)
3. URSS (1975)
4. Suède (1978)
5. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH 89)
6. Association internationale de radioprotection (AIRP 84)

Adaptation de (Ma 85)

Tableau 5

Lignes directrices canadiennes pour l'exposition aux ultrasons transmis dans l'air. Les niveaux de pression acoustique, par bande de tiers d'octave, sont indépendants de la durée d'exposition car les effets subjectifs peuvent apparaître immédiatement.

Fréquence (kHz)	NPA (dB)
16	75
20	75
25	110
31,5	110
40	110
50	110

Les limites d'exposition professionnelle recommandées dans le présent document peuvent être dépassées s'il est impossible de réduire les niveaux de pression acoustique par des moyens techniques (voir le paragraphe 4.2.2 ci-dessous) et si les travailleurs portent des protecteurs d'oreilles qui réduisent les niveaux ultrasonores à l'oreille aux niveaux de pression acoustique indiqués dans le tableau 5. Toutefois, pour éviter tout danger de réchauffement dans la plage des fréquences ultrasonores, le niveau de pression acoustique linéaire total mesuré ne doit jamais dépasser 137 dB pour toutes les autres parties du corps. Cette valeur est basée sur la valeur la plus faible (140 dB) (voir la figure 2) qui a présumément provoqué un léger réchauffement des plis de la peau. Une marge de sécurité de 3 dB (un facteur de 2 pour l'énergie) devrait empêcher tout réchauffement important du corps humain.

4.2.2 Mesures de protection contre l'exposition aux ultrasons transmis dans l'air

Les mesures de sécurité visant à protéger le personnel sont similaires aux mesures recommandées pour les bruits audibles. L'objectif est de faire en sorte que les niveaux de pression acoustique ambients ne dépassent pas le niveau d'exposition maximal admissible recommandé. Pour cela, il faut d'abord mesurer le NPA (voir les techniques de mesure à l'annexe 1), puis réduire les niveaux d'exposition là où c'est nécessaire, de préférence par des moyens techniques,

comme la réduction du niveau ultrasonore à la source ou l'installation de barrières acoustiques sur le trajet des ultrasons. Si cela est impossible, des protecteurs adéquats doivent être portés sur les oreilles.

Les mesures de protection sont beaucoup plus simples et plus économiques dans la gamme des fréquences ultrasonores que dans la gamme des fréquences audibles car les fréquences ultrasonores plus élevées ont tendance à être beaucoup plus facilement absorbées et réfléchies vers l'intérieur par les enceintes de protection. En outre, le rayonnement ultrasonore est beaucoup moins sujet à la diffraction par les orifices. Gold et coll. (Go 84) ont observé qu'un morceau de carton de 3 mm d'épaisseur était suffisant pour réduire les NPA de 70 dB entre 20 et 50 kHz. Crabtree et Forshaw (Cr 77) ont construit des enceintes relativement simples pour plusieurs appareils à nettoyer ultrasonores qui avaient produit des niveaux de pression acoustique, pour les ultrasons transmis dans l'air, supérieurs à la norme d'Acton. L'une de ces enceintes, constituée de contre-plaqué de 3/4 po revêtu d'une couche de styromousse d'un pouce et comportant un couvercle et un panneau antérieur fixés avec des charnières de piano, a permis d'atténuer le NPA de 85 à 55 dB dans la bande de tiers d'octave centrée sur 16 kHz. Des locaux ont été aménagés dans un hangar pour de gros appareils à nettoyer, avec des matériaux de construction simples tels que du placo-plâtre de 1/2 po et du contre-plaqué de 1/4 po. On a obtenu une atténuation d'au moins 40 dB, sans avoir à rendre les portes étanches. Acton (Ac 67) a décrit des mesures de protection simples prises pour une batterie d'appareils à nettoyer ultrasonores. L'enceinte était en chlorure de polyvinyle et Perspex, avec des rails en acier inoxydable à l'extérieur pour les portes. (On a utilisé ces matériaux en raison de leur résistance aux vapeurs corrosives produites lors du nettoyage.) Bien que l'enceinte fût loin d'être parfaitement étanche, Acton et Carson (Ac 67) ont réussi à atténuer le niveau de puissance acoustique de 10 dB à 20 kHz et de 15 dB à 40 kHz avec cet écran, ce qui était suffisant pour éliminer les effets subjectifs.

Lorsqu'il est pas impossible de faire appel à des solutions techniques, les protecteurs d'oreilles constituent un moyen simple et efficace de réduire le son aux fréquences ultrasonores. La réduction du niveau de pression acoustique aux fréquences ultrasonores devrait être d'au moins 14 dB avec les casques protecteurs et les bouchons en caoutchouc et de 24 dB avec les bouchons en mousse (Ac 83).

Annexe 1

Mesure des ultrasons transmis dans l'air

Les mesures doivent être effectuées aux endroits (généralement le lieu de travail) où une personne est exposée. Des mesures de champ préliminaires doivent être effectuées en diverses positions. La mesure finale du niveau de pression acoustique (NPA) doit être faite à la position de l'oreille de l'opérateur où le NPA est maximal. S'il existe une autre position à laquelle d'autres parties du corps de l'opérateur peuvent être exposées à un NPA de 137 dB ou plus, c'est cette valeur du NPA qui doit être comparée aux normes d'exposition.

Pour un signal directionnel, il convient d'estimer l'angle d'incidence, à moins que l'on estime que le champ ultrasonore est omnidirectionnel (diffus). Pour ce faire, on peut observer les changements de l'indication du sonomètre en fonction de l'orientation du microphone. Si le signal est directionnel, aux fréquences pour lesquelles l'orientation angulaire est importante, on observera une diminution pouvant atteindre 10 dB dans l'indication du sonomètre lorsque l'angle d'incidence varie de 0° (incidence normale) à 90° (incidence rasante). Enfin, on comparera la valeur spatiale maximale du NPA mesurée, après correction des erreurs systématiques possibles, plus la valeur absolue de l'incertitude estimée, avec les limites d'exposition admissibles recommandées indiquées au tableau 5 (section 4.2.1). Pour déterminer l'incertitude, il faut additionner les incertitudes estimées qui sont associées aux différentes sources d'erreur dans la mesure.

En résumé, pour juger raisonnablement si les limites recommandées ont été dépassées, il est important de déterminer la position du microphone à laquelle le niveau de pression acoustique, une fois

que les erreurs systématiques possibles sont corrigées, est maximal. Il est indispensable, en outre, d'estimer raisonnablement l'incertitude de la mesure. Les méthodes à utiliser sont décrites en détail ci-dessous.

L'étalonnage absolu d'un sonomètre au lieu de mesure s'effectue généralement à une seule fréquence, habituellement 1 kHz ou moins. Par conséquent, pour que les mesures soient fiables, il convient de corriger systématiquement en fonction de la réponse en fréquence relative du matériel utilisé pour la mesure des ultrasons transmis dans l'air. On peut trouver la correction à apporter dans les spécifications du fabricant; l'incertitude associée à cette correction doit alors être utilisée dans l'estimation finale de l'incertitude. On ne peut déterminer l'incertitude finale à partir du type normalisé de sonomètre car les tolérances permises à des fréquences élevées sont extrêmement variables. Par exemple, pour un sonomètre de précision de type 1, tel que défini soit dans la Publication 651 de la Commission électrotechnique internationale (CEI 1979) soit dans la norme ANSI S1.4-1983 de l'American National Standards Institute (ANSI 1983), les tolérances concernant la réponse en fréquence entre 16 kHz et 20 kHz varient entre 3 dB et moins l'infini. Au-dessus de 20 kHz, aucune tolérance n'est spécifiée. Bien entendu, il existe des sonomètres de type 1 appropriés pour la mesure des ultrasons transmis dans l'air, mais l'indication du sonomètre dépendra de la réponse en fréquence du microphone et des amplificateurs du sonomètre.

La réponse en fréquence du sonomètre peut être décomposée en deux éléments: la réponse en fréquence électrique du sonomètre [avec des tolérances normalisées allant jusqu'à 100 kHz spécifiées dans la norme ANSI S1.4-1985 (ANSI 1985)] et la réponse en fréquence du microphone due aux effets de diffraction. Aux fréquences auxquelles la taille du microphone ne semble plus négligeable, la réponse en fréquence dépend également de l'angle d'incidence. Là encore, il convient de se référer aux spécifications du fabricant pour apporter les corrections appropriées selon que la réponse est angulaire ou omnidirectionnelle à la fréquence considérée.

On peut déterminer si le champ ultrasonore peut être assimilé à un champ libre ou à un champ omnidirectionnel en traçant un spectre approximatif du champ, si l'on connaît la relation approximative entre l'indication du sonomètre et l'angle d'incidence, les dimensions du local ainsi que le matériau dont sont faits les murs ou les barrières se trouvant dans le local. Si l'on est capable de déterminer la nature du champ, il est possible que l'on puisse choisir entre plusieurs types de microphones différents permettant d'effectuer des mesures avec une incertitude relativement faible⁽³⁾.

Si le champ est toujours assimilable à un champ libre, un microphone d'un quart de pouce conçu pour une réponse en fréquence en champ libre uniforme, fonctionnant sous une incidence normale et sans la grille protectrice, convient pour les bandes d'octave dont la fréquence médiane est inférieure à 50 kHz. Dans la mesure où la réponse en fréquence est corrigée, on peut aussi utiliser un microphone d'un quart de pouce fonctionnant avec la grille protectrice en place. Un microphone d'un demi-pouce conçu pour une réponse en fréquence en champ libre uniforme, fonctionnant sous une incidence normale avec la grille protectrice en place, convient pour les bandes d'octave dont la fréquence médiane est inférieure à 31,5 kHz ou pour les signaux en bande étroite de fréquence inférieure à 40 kHz. Si l'on applique les spécifications du fabricant pour la réponse en fréquence relative, on peut réduire les incertitudes globales associées à l'indication du sonomètre à moins de $\pm 1,5$ dB.

Pour les champs omnidirectionnels, le meilleur microphone est un microphone d'un quart de pouce conçu pour une réponse en fréquence uniforme à un angle d'incidence variable, fonctionnant sans la grille protectrice. Là encore, on peut utiliser la grille protectrice si l'on apporte les corrections nécessaires. Par contre, dans les

3. Les explications suivantes relatives aux microphones fournissent un exemple de la planification requise pour les mesures des ultrasons transmis dans l'air. Elles sont basées uniquement sur les spécifications des microphones utilisés au BRPIM. Ces spécifications peuvent varier suivant les fabricants.

champs omnidirectionnels, le microphone d'un demi-pouce ne convient pas aux fréquences supérieures à 25 kHz en raison de la chute abrupte dans la réponse.

La principale difficulté que pose la mesure des ultrasons transmis dans l'air vient du fait que le champ ultrasonore consiste en fait en une superposition d'un champ omnidirectionnel et d'un champ libre et qu'il est impossible de déterminer l'intensité de chaque type de champ. Dans ce cas, la meilleure façon de réduire les incertitudes au minimum consiste à utiliser un microphone d'un quart de pouce fonctionnant sans la grille protectrice et sous incidence rasante par rapport à la composante directionnelle apparente du champ ultrasonore. Dans ces conditions, la différence entre la réponse au champ omnidirectionnel et la réponse au champ libre est inférieure à 1 dB jusqu'à 30 kHz et à 2 dB jusqu'à 40 kHz. Par conséquent, on peut réduire les incertitudes dans les mesures du NPA à moins de ± 2 dB environ. Malheureusement, si l'on utilise continuellement le microphone sans sa grille protectrice, on augmente considérablement les risques de dommages mécaniques irrémédiables. Une autre solution consiste à utiliser le microphone d'un quart de pouce avec sa grille protectrice près de l'incidence rasante. On peut corriger en utilisant une réponse située à mi-chemin entre la réponse omnidirectionnelle et la réponse correspondant à l'incidence rasante en champ libre. La différence entre ces deux réponses est inférieure à 4 dB jusqu'à 40 dB. Avec cette méthode, on devrait pouvoir réduire l'incertitude à moins de ± 3 dB. En raison de la chute abrupte dans la réponse à incidence rasante en champ libre avec un microphone d'un demi-pouce à environ 20 kHz et des grandes différences entre la réponse à une incidence normale en champ libre et la réponse omnidirectionnelle, le microphone d'un demi-pouce ne convient pas du tout pour les mesures dans les champs ultrasonores dans lesquels la composante omnidirectionnelle est importante.

Il convient aussi de tenir compte de la plage dynamique lorsqu'on établit une méthode de mesure. La limite supérieure du NPA que l'on peut mesurer de façon sûre peut dépendre de la longueur du câble car la puissance de sortie du préamplificateur est limitée par

la charge capacitive d'un long câble. Dans la gamme de fréquences comprise entre 20 kHz et 50 kHz, qui est celle du matériel utilisé dans notre laboratoire, le NPA peut être limité à moins de 130 dB pour des câbles de plus de 3 m de longueur. La limite inférieure du NPA que l'on peut mesurer de façon sûre dépend de la taille du microphone. Par exemple, on ne peut pas utiliser un microphone de 1/8 de pouce avec les ultrasons de basse fréquence, même si la réponse en fréquence est très uniforme, car le faible rapport signal/bruit de ces petits microphones limite le NPA minimal mesurable à environ 76 dB, valeur supérieure aux limites d'exposition recommandées dans les bandes de tiers d'octave centrées sur 16 et 20 kHz.

Comme les limites recommandées sont données par bandes de tiers d'octave, il convient d'utiliser des filtres de tiers d'octave (ou un analyseur de spectre). L'erreur sur le NPA associée à la réponse en fréquence du filtre et l'erreur sur le NPA associée à la précision de l'analyseur doivent être déterminées à partir des spécifications du fabricant et elles doivent être incluses dans l'estimation de l'incertitude. Par ailleurs, étant donné le saut de 75 à 110 dB dans l'exposition admissible lorsqu'on passe de la bande de tiers d'octave centrée sur 20 kHz à la bande centrée sur 25 kHz, il faut faire particulièrement attention lorsqu'on effectue des mesures à 20 kHz. Un appareil émettant seulement dans la bande centrée sur 25 kHz pourrait, suivant les «jupes» du filtre de bande de 20 kHz utilisé, *sembler* émettre dans la bande centrée sur 20 kHz avec un NPA non négligeable. Étant donné les tolérances relativement élevées admises par les normes en ce qui concerne les «jupes» des filtres, par exemple la norme ACNOR Z107.5-1975 (ACNOR 1975) ou la norme CEI 225 (CEI 1996, en cours de révision), les résultats obtenus avec divers filtres de bande de tiers d'octave satisfaisant les mêmes normes peuvent présenter des différences importantes. Il est donc essentiel de bien connaître la réponse en fréquence du filtre de bande de tiers d'octave, spécifiée par le fabricant, et d'en tenir compte dans les mesures.

Annexe 2

Glossaire

Le but de ce glossaire est d'expliquer les termes utilisés dans le présent document que certains lecteurs pourraient ne pas connaître. Les explications sont basées sur les définitions normalisées données dans les références citées. Dans certains cas, les définitions ont été raccourcies ou paraphrasées pour plus de clarté. Le lecteur trouvera dans les normes citées des définitions plus rigoureuses.

Audible supérieure – Qui se rapporte aux ondes ou aux vibrations dont les fréquences se situent dans la partie supérieure de la gamme des fréquences audibles. Dans le présent document, les ondes audibles supérieures sont des ondes acoustiques dont la fréquence se situe entre 10 et 18 kHz (Mi 74).

Bandes de tiers d'octave – Intervalle entre deux fréquences dont le rapport est égal à $2^{1/3}/1$. Ces fréquences définissent les limites de la bande. Normalement, la bande est désignée par sa fréquence médiane, qui est la moyenne géométrique des deux fréquences limites. Pour les fréquences audibles supérieures et ultrasoniques, les bandes ont été appelées bandes de 10, 12,5, 16, 20, 25, 31,5, 40 et 50 kHz (ACNOR 75).

Cavitation – Au sens large, toute activité d'origine sonore associée à des masses hautement compressibles (bulles) de gaz ou de vapeur dans le milieu de propagation. Par exemple, formation de bulles dans le liquide entourant l'élément actif d'un désintégrateur de cellules. Avec les ultrasons de puissance élevée, cette activité est habituellement imprévisible et violente (NCRP 83).

Champ libre – Condition de propagation de l'onde acoustique dans un milieu isotrope homogène (par exemple, l'air) dont les limites (par exemple, les murs d'une pièce) exercent un effet négligeable sur l'onde acoustique (CEI 84).

Champ omnidirectionnel – Condition de propagation des ondes acoustiques donnant naissance à un champ acoustique qui possède une densité d'énergie statistiquement uniforme et dans lequel les directions de propagation en tout point du champ sont distribuées de façon aléatoire (CEI 84).

Déplacement temporaire de seuil (TTS) – Perte d'audition temporaire consécutive à une exposition à une onde acoustique. La sensibilité auditive perdue est récupérée, en tout ou en partie, au bout d'une période de temps donnée après que l'exposition a cessé (OI 75).

Niveau de pression acoustique (NPA) – Exprimé en décibels (dB), le NPA est égal à 20 fois le logarithme décimal du rapport entre une pression acoustique donnée et la pression acoustique de référence, qui est égale à 20 micropascals (mPa) pour le son transmis dans l'air. La pression acoustique est la valeur efficace de la pression acoustique instantanée pendant un intervalle de temps donné (CEI 84).

Production de micro-courants – Courant fluide circulaire à l'échelle du micromètre. Se produit souvent au voisinage de bulles en vibration qui ont été mises en mouvement par suite du phénomène de cavitation dû aux ultrasons de puissance élevée (NCRP 83).

Réponse – Signal de sortie d'un dispositif résultant d'un stimulus appliqué dans des conditions précises. Par exemple, la réponse d'un microphone est la tension de sortie produite par une onde acoustique envoyée sur le microphone (CEI 84).

Réponse en champ libre – Réponse d'un microphone à une onde acoustique incidente qui, une fois le microphone enlevé, se propagerait dans des conditions de champ libre (CEI 84).

Réponse omnidirectionnelle – Réponse d'un microphone à une onde acoustique incidente qui, une fois le microphone enlevé, se propagerait dans des conditions de champ omnidirectionnel (CEI 84).

Seuil d'audition – Pour un auditeur donné, niveau de pression acoustique minimal d'un son donné capable de provoquer une sensation auditive. Le son atteignant l'oreille, émis par d'autres sources, est supposé négligeable (CEI 84).

Transducteur – Dispositif capable de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement (CEI 86).

Ultrasonore – Qui se rapporte aux ondes ou aux vibrations ultrasonores. Dans le présent document, les ondes ultrasonores sont des ondes acoustiques ayant une fréquence supérieure à 18 kHz. La valeur limite de 18 kHz représente un compromis entre les deux valeurs les plus souvent rencontrées dans la documentation, 16 et 20 kHz.

Ultrasons de puissance élevée – Il n'existe pas de définition normalisée des ultrasons de puissance élevée. Dans le présent document, les ultrasons de puissance élevée sont des ultrasons possédant une puissance ou une intensité suffisante pour que l'énergie de vibration à laquelle la pièce de travail est exposée provoque un changement physique permanent (Sh 75).

Références

- Ac 67 Acton, W.I., Carson, M.B. (1967). "Auditory and Subjective Effects of Airborne Noise from Industrial Ultrasonic Sources." *Brit. J. Industr. Med.*, vol. 24, pp. 297-304.
- Ac 68 Acton, W.I. (1968). "A Criterion for the Prediction of Auditory and Subjective Effects due to Airborne Noise from Ultrasonic Sources." *Ann. Occup. Hyg.*, vol. 11, pp. 227-234.
- Ac 74 Acton, W.I. (1974). "The Effects of Industrial Airborne Ultrasound on Humans." *Ultrasonics*, mai, pp. 124-128.
- Ac 75 Acton, W.I. (1975). "Exposure Criteria for Industrial Ultrasound." *Ann. Occup. Hyg.*, vol. 18, pp 267-268.
- Ac 77 Acton, W.I., Hill, C.R. (1977). "Hazards of Industrial Ultrasound." *Protection*, vol. 14, no. 10, pp. 12-17.
- Ac 83 Acton, W.I. (1983). "Exposure to Industrial Ultrasound: Hazards, Appraisal and Control." *J. Soc. Occup. Med.*, vol. 33, pp. 107-113.

- ACGIH 89 ACGIH (1989). Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices for 1988-1989. Disponible auprès de l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 6500 Glenway Ave., Bldg. D-7, Cincinnati, OH, É.-U. 45211-4438.
- ACNOR 75 Norme Z107.5-1975 de l'Association canadienne de normalisation (ACNOR). "Octave, half-octave and third-octave Band Filter Sets." Disponible auprès de l'Association canadienne de normalisation, 178 Rexdale Blvd., Rexdale (Ontario) M9W 1R3.
- AIRP 84 Association internationale de radioprotection (AIRP) (1984). "Interim Guidelines on Limits of Human Exposure to Airborne Ultrasound." *Health Physics*, vol. 46, pp. 969-974.
- A1 48 Allen, C.H., Frings, H., Rudnick, I. (1948). "Some Biological Effects of Intense High Frequency Airborne Sound." *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 20, pp. 62-65.
- An 86 André, G., Damongeot, A. (1986), "Émissions sonores et ultrasonores lors du soudage par ultrasons. Risques et moyens de prévention." *Cahiers de notes documentaires* (no 123, 2ième trimestre). Disponible auprès de l'Institut national de recherche et de sécurité, 30, rue Olivier Noyer, 75680 Paris Cedex 14, France.

- ANSI 83 Norme S1.4-1983 de l'American National Standards Institute (ANSI). "Specification for Sound Level Meters." Disponible auprès du Standards Secretariat, Acoustical Society of America, 335 East 45th Street, New York, NY, É.-U., 10017-3483.
- ANSI 85 Norme S1.4a-1985 de l'American National Standards Institute (ANSI). "Amendment to ANSI S1.4-1983." Disponible auprès du Standards Secretariat, Acoustical Society of America, 335 East 45 th Street, New York, NY, É.-U., 10017-3483.
- Ca 86 Carnes, K.I., Dunn, F. (1986). "Low-Kilohertz-Water-Borne Ultrasound Biological Effects." *Radiat. Environ. Biophys.*, vol. 25, pp. 235-240.
- CEI 66 Publication 225 (1966) de la Commission électrotechnique internationale (CEI). "Octave, Half-Octave and Third Octave Band Filters Intended for the Analysis of Sounds and Vibrations." Disponible auprès du Bureau Central de la Commission électrotechnique internationale, 3, rue de Varembé, Genève, Suisse.
- CEI 79 Publication 651 (1979) de la Commission électrotechnique internationale (CEI). "Sound Level Meters." Disponible auprès du Bureau Central de la Commission électrotechnique internationale, 3, rue de Varembé, Genève, Suisse.

- CEI 84 Publication 50(801) (1984) de la Commission électrotechnique internationale (CEI). “Advance Edition of the International Electrotechnical Vocabulary. Chapter 801: Acoustics and Electroacoustics.” Disponible auprès du Bureau Central de la Commission électrotechnique internationale, 3, rue de Varembé, Genève, Suisse.
- CEI 86 Publication 854 (1986) de la Commission électrotechnique internationale (CEI). “Methods of Measuring the Performance of Ultrasonic Pulse-Echo Diagnostic Equipment”. Disponible auprès du Bureau Central de la Commission électrotechnique internationale, 3, rue de Varembé, Genève, Suisse.
- Cr 77 Crabtree, R.B., Forshaw, S.E. (1977). “Exposure to Ultrasonic Cleaner Noise in the Canadian Forces.” DCIEM, rapport technique #77X45. Disponible auprès du DCIEM, 1133 Sheppard Ave. W., P.O. Box 2000, Downsview, Ontario M3M 3B9.
- Da 48 Davis, H. (1948). “Biological and Psychological Effects of Ultrasonics.” J. Acoust. Soc. Am., vol. 20, pp. 605-607.
- Da 54 Danner, P.A., Ackerman, E., Frings, H.W. (1954). “Heating in Haired and Hairless Mice in High-Intensity Sound Fields from 6 - 22 kHz.” J. Acoust. Soc. Amer., vol. 26, pp. 731-739.
- Da 66 Dallos, P.J., Linnell, C.O. (1966). “Subharmonic Components in Cochlear-Microphonic Potentials.” J. Acoust. Soc. Am., vol. 40, pp. 4-11.

- Do 67 Dobroserdov, V.K. (1967). "The Effect of Low Frequency Ultrasonic and High Frequency Sound Waves on Workers." *Hygiene and Sanitation*, vol. 32, pp. 176-181.
- El 49 Eldredge, D.H., Parrack, H.O. (1949). "Biological Effects of Intense Sound." *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 21, p. 55
- FDA 81(a) Center for Devices and Radiological Health, Food and Drug Administration (1981). "An Evaluation of Radiation Emission from Video Display Terminals." HHS Publication (FDA) 81-8153, fév. 1981. Disponible auprès de la Division of Compliance, CDRH, Rockville, MD, É.-U. 20857.
- FDA 81(b) Herman, B.A., Powell, D. (1981). "Airborne Ultrasound: Measurement and Possible Adverse Effects." HHS Publication (FDA) 81-8163, mai 1981. Disponible auprès du CDRH, Rockville, MD, É.-U. 20857.
- Fe 84 Feller, A.M., Domres, B. (1984). "Cutaneous Gangrene and Osteonecrosis Resulting from Thermal Injuries Inflicted by Ultrasound." *Akt. Traumatol.* vol. 14, pp. 37-39.
- Fi 68 Fishman, S.S. (1968). "Biological Effects of Ultrasound: In Vivo and In Vitro Haemolysis." *Actes de la Western Pharmacology Society*, vol. 11, pp. 149-150.
- Gi 49 Von Gierke, H.E. (1949). "Sound Absorption at the Surface of the Body of Man and Animals." *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 21, p.55.

- Gi 50 Von Gierke, H.E. (1950). "Subharmonics Generated in the Ears of Humans and Animals at Intense Sound Levels." *Federation Proc.*, vol. 9, p. 130(a).
- Gi 52 Von Gierke, H.E., Parrack, H.O., Eldredge, D.N. (1952). "Heating of Animals by Absorbed Sound Energy." *J. Cellular Comp. Physiol.*, vol. 39, pp. 487-505.
- Go 84 Gold, R.E., Decker, T.N., Vance, A.D. (1984). "Acoustical Characterization and Efficacy Evaluation of Ultrasonic Pest Control Devices Marketed for Control of German Cockroaches." *J. Econ. Entomology*, vol. 77, pp. 1507-1512.
- Gr 66 Grigor'eva, V.M. (1966). "Effect of Ultrasonic Vibrations on Personnel Working with Ultrasonic Equipment." *Soviet Physics-Acoustics*, vol. II, pp. 426-427.
- Gr 80 Grzesik, J., Pluta, E. (1980). "Noise and Airborne Ultrasound Exposure in the Industrial Environment." *Actes du 3^{ème} Int. Congress on Noise as a Public Health Problem*. Freiburg, Allemagne de l'Ouest, 25-29 septembre 1978. ASHA Reports 10. The American Speech-Language-Hearing Association, Rockville, Maryland, avril 1980, pp. 657-661.
- Gr 83 Grzesik, J., Pluta, E. (1983). "High Frequency Hearing Risk of Operators of Industrial Ultrasonic Devices." *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, vol. 53, pp. 77-78.

- Gr 86 Grzesik, J., Pluta, E. (1986). "Dynamics of High-Frequency Hearing Loss of Operators of Industrial Ultrasonic Devices." *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, Vol. 57, pp. 137-142.
- He 81 Herbetz, J., Grunter, K. (1981). "Untersuchungen zur hoerkurvenmaessigen Bewertung von Ultraschall in Luft." *Fortschritte der Akustik - DAGA'81*. Berlin: VDE-Verlag, pp. 509-512.
- He 84 Herbetz, J. (1984). "Loudness of Airborne Ultrasonic Noise." *Actes de la Conférence internationale sur les ultrasons (1983)*, S. 226-231.
- Kn 68 Knight, J.J. (1968). "Effects of Airborne Ultrasound on Man." *Ultrasonics*, janvier, pp. 39-42.
- Ma 85 auf der Maur, A.N. (1985). "Limits of Exposure to Airborne Ultrasound." *Ann. Am. Conf. Ind. Hyg.*, vol. 12, pp. 177-181.
- Mi 74 Michael, P.L. et coll. (1974). "An Evaluation of Industrial Acoustic Radiation above 10 kHz." *Préparé pour le N.I.O.S.H. dans le cadre du contrat no HSM-99-72-125*.
- NCRP 83 Rapport #74 (1983) du NCRP. "Biological Effects of Ultrasound: Mechanisms and Clinical Implications." National Council on Radiation Protection and Measurements, 7910 Woodmont Avenue, Bethesda, MD, É.-U. 20814.
- Ne 80 Neppiras, E.A. (1980). "Acoustic Cavitation Thresholds and Cyclic Processes." *Ultrasonics*, septembre, pp. 201-209, 230.

- Ol 75 Industrial Noise and Hearing Conservation (1975).
 J.B. Olishifski and E.R. Harford, eds. National Safety Council, 425 North Michigan Ave., Chicago, IL, U.S.A. 60611.
- OMS 88 Hill, C.R., ter Haar, G. (1988). "Ultrasound," dans Non-Ionizing Radiation Protection, ed. M.J. Suess. Copenhague: Organisation mondiale de la santé, Publications régionales.
- Pa 66 Parrack, H.O. (1966). "Effect of Air-borne Ultrasound on Humans." Internat. Audiol., vol. 5, pp 294-308.
- Ro 57 Romani, J.D., Bugard, P. (1957). "Nouveaux essais sur l'action des bruits sur le système endocrinien." Svudy-ivs, bol. 7, pp. 92-93.
- Sh 75 Shoh, A. (1975). "Industrial Applications of Ultrasound – A Review. I. High-Power Ultrasound." IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, vol. SU-22, no. 2, pp. 60-71.
- Sk 65 Skillern, C.P. (1965). "Human Response to Measured Sound Pressure Levels from Ultrasonic Devices." Indust. Hyg. J., vol. 26, pp. 132-136.
- Sw 82 Normes suisses de santé et sécurité au travail (1982). "Ultrasonic Equipment as a Source of Noise." No 137. Publié par Schweizerische Unfallversicherungenstalt, 6002 Lucerne, Suisse.
- USAF 76 United States Air Force (1976). Hazardous Noise Exposure. USAF Regulation 161-35.